

含水量对沉积岩力学性质及其冲击倾向性的影响

孟召平^{1,2}, 潘结南^{2,3}, 刘亮亮², 孟贵希², 赵振华²

(1. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 中国矿业大学 资源与地球科学系, 北京 100083; 3. 河南理工大学 资源与环境工程系, 河南 焦作 454000)

摘要: 通过试验和统计分析系统研究不同含水条件下煤系沉积岩力学性质及其冲击倾向性, 建立岩石力学性质及其冲击倾向性与含水量之间的相关关系和模型, 揭示含水量对岩石力学性质及其冲击倾向性的控制机制。研究表明: 岩石单轴抗压强度和弹性模量值随含水量的增加而降低; 不同岩性岩石单轴抗压强度和弹性模量值受含水量的影响程度不同, 降低的速率受岩性所控制。在干燥或较少含水量情况下, 应力-应变曲线在峰值强度后岩石表现为脆性和剪切破坏, 具有明显的应变软化特性, 且随着含水量的增加, 峰值强度后岩石主要为塑性破坏, 应变软化特性不明显。随着含水量的增加, 岩石脆性指标修正值(BIM)逐渐增加, 弹性变形指数逐渐减小, 岩石在受力过程中储存的弹性应变能随含水量的增加而急剧减少, 而消耗的塑性永久变形能相对增加, 即岩石的冲击倾向性随含水量的增加而显著降低。

关键词: 岩石力学; 含水量; 力学性质; 脆性指标; 冲击倾向性

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)增 1 - 2637 - 07

INFLUENCE OF MOISTURE CONTENTS ON MECHANICAL PROPERTIES OF SEDIMENTARY ROCK AND ITS BURSTING POTENTIAL

MENG Zhaoping^{1,2}, PAN Jienan^{2,3}, LIU liangliang², MENG Guixi², ZHAO Zhenhua²

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2. Department of Resources and Geoscience, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 3. Department of Resources and Environment Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China)

Abstract: The mechanical properties of coal series sedimentary rock and its bursting potential in different moisture contents are studied, and the models and correlations between moisture content and bursting potential are established. The controlling mechanism of moisture content of mechanical properties of sedimentary rock and its bursting potential is also revealed. It is shown that the uniaxial compressive strength and the values of elastic modulus decrease with the increase of moisture content, whose influence degree differs from lithology, and the decreasing rates are controlled by lithology. The rock after peak strength of stress-strain curve represents brittleness and shear failure has obvious strain softening behavior in the condition of dried or with small moisture content. With increase of moisture content, the brittleness index modified(BIM) of rock increases gradually, while elastic deformation exponential decreases and the stored elastic strain energy decreases sharply in the process of

收稿日期: 2007 - 12 - 26; **修回日期:** 2008 - 03 - 18

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2007CB209405); 国家自然科学基金资助项目(40772100); 全国优秀博士学位论文作者专项资金(200247); 高等学校博士学科点专项科研基金(20050290009)

作者简介: 孟召平(1963 -), 男, 博士, 1983年毕业于焦作矿业学院地质系煤田地质专业, 现任湖北省“楚天学者”、三峡大学地质工程专业特聘教授、博士生导师, 主要从事矿井工程地质和煤油气地质方面的教学和研究工作。E-mail: mzp@cumtb.edu.cn

stress; however, the consumed permanent plastic deformation energy increases relatively, which means that the bursting potential of rock decreases significantly with the increase of moisture content.

Key words: rock mechanics; moisture content; mechanical properties of rock; brittleness index; bursting potential

1 引言

由于沉积岩形成于地壳浅部,其生成和赋存环境与岩浆岩或变质岩显然不同,岩性较为软弱,变化较大,成分复杂,其力学性质除受岩石的物质成分、结构影响外,主要取决于它所处的环境的条件,尤其是地下水对其的影响明显^[1]。地壳中的岩石,尤其是沉积岩,大部分都或多或少地含有水分或溶液,有的含有油气。L. Müller^[2]曾指出过,岩体是两相介质,即由矿物-岩石固相物质和含于孔隙和裂隙内水的液相物质组成^[2]。水的存在会降低岩石的弹性极限,提高韧性和延性,使岩石软化,易于变形。水在岩石中主要以束缚水和自由水2种方式存在,对岩石能够产生连接、润滑、水楔、孔隙水压和溶蚀等作用,并共同影响着岩石的强度和变形的力学性质。关于水对岩石力学性质及其冲击倾向性的影响问题,前人多集中在对岩石抗压强度方面的研究^[3-6]。张金才等^[3]研究了水压力对岩体的破坏作用,探讨了水对岩体强度的影响。孟昭平^[4]基于含煤岩系主要岩石类型,初步分析了决定岩石力学性质的主要控制因素,如岩性、地应力和水,探讨了不同岩性岩石在不同侧压和含水条件下的力学特征。王军等^[5]针对南京红山窑水利枢纽工程中的红砂岩圆柱体试样,采用RMT-150B多功能刚性岩石伺服试验机,通过常规直接剪切试验的方法对不同含水量状态下的红砂岩圆柱体试样进行室内试验研究。通过对试验结果的线性回归分析得到膨胀岩的凝聚力 and 内摩擦角与含水量之间良好的对数关系,并结合莫尔-库仑准则可以分析某些特定地区膨胀岩的抗剪强度与含水量的关系。刘斌等^[6]研究了水饱和裂纹对地壳岩样中地震波速及各向异性的影响,并可以估计岩样中的裂纹密度。有关岩石冲击倾向性的研究,许多学者从不同角度提出了一些很有价值的冲击倾向性指标,如弹性能指标(W_{ET})^[7-9]、脆性指标修正值(BIM)^[10]、能量耗散指标(K)^[11]。其中,弹性能指数反映了岩石在单轴压缩条件下的峰前蓄能和耗能情况,能够较好地体现岩石在应力作

用下储存弹性应变能的能力和大小;而对不同含水状态下岩石的变形力学特性和冲击倾向性的影响研究涉及不多,使对其认识受到局限^[12]。为此,本文将通过试验和统计分析系统研究不同含水条件下煤系沉积岩岩石力学性质及其冲击倾向性,建立岩石力学性质及其冲击倾向性与含水量之间的相关关系和模型,揭示含水量对岩石力学性质及其冲击倾向性的控制机制,将使得复杂的地下工程设计与施工决策更趋于合理与可靠。

2 含水量对岩石力学性质的影响

2.1 含水量对岩石变形与强度的影响

为了研究含水量对岩石变形与强度的影响,岩石的力学试验采用美国MTS公司生产的MTS 815.02电液伺服控制试验系统(servo-controlled testing system)和YTD-200型电子式压力试验机。试验样品来自于淮南新集矿和开滦唐山矿石炭~二叠纪含煤岩系主采煤层顶底板岩石,岩性包括砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩、泥质岩和石灰岩等类型。当岩芯取出后,及时进行编号、岩芯鉴定和蜡封处理,然后将岩芯装入特制的岩芯箱,送到实验室,按相关规程对岩样进行加工和试验研究。

水对沉积岩力学性质的影响程度明显高于岩浆岩和变质岩。随含水量增加,岩石的单轴抗压强度和弹性模量值均急剧降低(见表1)。

(1) 由于岩石的岩性和结构不同,降低的速率不同。主要取决于岩石本身胶结状况、结晶程度和是否含有亲水性黏土矿物等因素。

① 对于同一岩性岩石,单轴抗压强度受含水量影响具有如下关系:

$$\sigma_c = \sigma_0 - k_1 w \quad (1)$$

式中: σ_c 为不同含水量状态下岩石单轴抗压强度(MPa), σ_0 为干燥状态下岩石单轴抗压强度(MPa), k_1 为水对岩石强度影响系数(如表2所示), w 含水量(%). 其取值见表2。

② 对于同一岩性岩石,弹性模量受含水量影响

表 1 水对岩石力学性质影响试验结果表

Table 1 Testing results of influence of moisture content on rock mechanical properties

岩性	含水量 w/%	单轴抗压强度 σ_c /MPa	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ
细粒石英砂岩	0.00	142.50	73.33	0.330
	0.23	82.00	48.30	0.340
	0.35	44.56	23.28	0.286
石灰岩	0.00	110.52	41.04	0.032
	0.06	89.92	41.69	0.161
	0.11	58.08	42.35	0.189
泥质粉砂岩	0.00	119.40	-	-
	0.56	88.50	-	-
	0.78	51.60	-	-
	0.84	68.30	-	-
极细粒砂岩	0.07	218.36	44.01	-
	0.08	225.48	41.44	-
	0.86	93.80	15.94	-
	0.60	127.45	23.67	-
泥岩	3.08	13.55	2.91	-
	3.25	13.11	1.70	-
	4.57	6.71	0.73	-
	5.13	4.38	0.49	-

表 2 水对岩石强度影响系数

Table 2 Influencing coefficients of moisture content on uniaxial compressive strength

岩性	系数 σ_0	系数 k_1	含水量 w/%	软化系数 / K_R	回归方程 相关系数 R
细粒石英砂岩	143.35	277.59	≤ 0.35	0.32	0.99
极细砂岩	233.08	166.14	≤ 0.86	0.39	0.99
泥质粉砂岩	120.98	71.61	≤ 0.84	0.50	0.94
泥岩	30.36	4.93	≤ 5.13	0.17	0.95
石灰岩	112.94	472.33	≤ 0.11	0.54	0.98

也具有如下关系:

$$E = E_0 - k_2 w \quad (2)$$

式中: E 为不同含水量状态下岩石弹性模量(GPa), E_0 为干燥状态下岩石弹性模量(GPa), k_2 为水对岩石弹性模量影响系数, 其取值见表 3。

(2) 由于成分和结构不同, 不同岩性岩石的力学强度和刚度不同, 吸水性不一样。随着碎屑颗粒粒度由粗到细, 即由砂岩到泥岩变化, 岩石的单轴抗压强度和弹性模量随之减弱(见图 1)。表现为, 砂岩和石灰岩岩石强度和刚度大, 同时, 岩石的吸水

表 3 水对岩石弹性模量影响系数

Table 3 Influencing coefficients of moisture content on elastic modulus

岩性	弹性模量 E_0 /GPa	系数 k_2	含水量 w/%	弹性模量降低系数 K_E	回归方程 系数 R
细粒石英砂岩	75.07	138.44	≤ 0.35	0.35	0.98
极细砂岩	45.15	34.53	≤ 0.86	0.34	0.99
泥质粉砂岩	-	-	-	-	-
泥岩	5.49	1.01	≤ 5.13	0.06	0.91
石灰岩	42.36	11.88	≤ 0.11	0.97	0.99

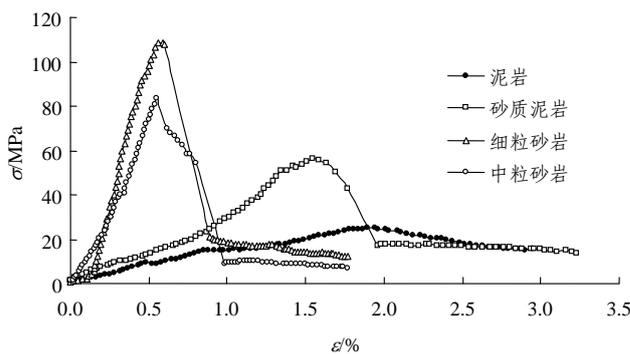


图 1 不同岩性岩石单轴全应力 - 应变曲线

Fig.1 Complete stress-strain curves of different lithologic characteristics

性相对较弱; 而泥岩岩石的强度和刚度小, 岩石的吸水性相对较强(见图 2)。

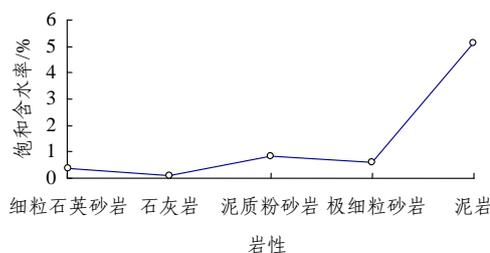


图 2 不同岩性岩石饱和含水率对比图

Fig.2 Saturation moisture contents of different lithologic characteristics

除了水对岩石的强度产生重要影响外, 当岩石内的含水量不同时, 其变形特征也受到显著影响。

周瑞光等^[13]的研究成果, 进一步证实了弹性模量及泊松比与含水量的关系服从指数函数关系的规律:

$$E = E_0 \exp(-bw) \quad (3)$$

$$\mu = \mu_0 \exp(cw) \quad (4)$$

式中： E_0 ， μ_0 分别为岩石干燥时的弹性模量和泊松比； E ， μ 分别为对应一定含水量 w 时的弹性模量和泊松比； b ， c 均为与岩性有关的试验常数。

2.2 不同含水量下的变形破坏机制

含水量不仅影响着岩石的强度和变形参数的大小，而且影响到岩石的变形破坏机制。随着含水量增加，泥岩的弹性模量及峰值强度均急剧降低，且峰值强度对应的应变值有随之增大的趋势。同时，在干燥或较少含水量情况下，岩石表现为脆性和剪切破坏，具有明显的应变软化特性，且随着含水量的增加，峰值强度后岩石主要为塑性破坏，应变软化特性不明显。

岩石是由多种矿物成分组成的，不同岩石所含的矿物成分不同，因而遇水软化的性态也不同。大部分岩石中含有黏土质矿物，这些矿物遇水软化泥化，降低了岩石骨架的结合力，如黏土矿物中蒙脱石吸水膨胀。另外，当岩石中含有石英和其他硅酸盐时，受水的作用 SiO_2 键因水化作用而削弱，致使岩石强度降低。岩石强度试验结果也证明，岩石浸水后强度明显降低，并且岩石浸水时间越长，其强度降低越大，水对岩石的这种作用称为岩石的软化。岩石软化系数(K_R)是指岩石饱水抗压强度(R_{cw})与干燥岩石试件单轴抗压强度(R_c)的比值：

$$K_R = \frac{R_{cw}}{R_c} \quad (5)$$

式中： R_{cw} ， R_c 分别为饱水和岩石与干燥岩石试件的单轴抗压强度(MPa)。

岩石弹性模量降低系数(K_E)是指岩石饱水弹性模量(E_{cw})与干燥岩石试件弹性模量(E_c)的比值：

$$K_E = \frac{E_{cw}}{E_c} \quad (6)$$

式中： E_{cw} ， E_c 分别为饱水和岩石与干燥岩石试件的弹性模量(GPa)。

显然， K_R 值愈小则岩石的软化性愈强。当岩石的 $K_R > 0.75$ 时，岩石软化性弱；同时也可说明其抗冻性和抗风化能力强。统计表明(见表 2)，煤系沉积岩石软化系数(K_R)为 0.17~0.54，弹性模量降低系数为 0.06~0.97(见表 3)，反映煤系沉积岩石软化性较强，在一般情况下，饱水后岩石力学强度和弹性模量可以下降为干燥岩石的 30%~40%，因此，在地下水的影响下煤系岩石易于变形与破坏；在高压水的作用下有可能由渗水发展成涌水，最后演化为强渗流通道。

水溶液对岩石变形与强度影响是由于水的加入而使分子活动能力加强，在岩石孔隙、裂隙中的液体或气体会产生孔隙压力，抵消一部分作用在岩石内部任意截面的总应力(包括围压和构造运动所产生的应力)，使岩石的弹性屈服极限降低，易于塑性变形，同时还会降低岩石的抗剪强度，使岩石剪切破坏。例如水库蓄水使地下水位抬升，由于岩体中空隙水压力增高，岩体的抗剪强度降低。而大面积的长期抽取地下水引起的地下水位的降低，会造成大范围内的地面沉降。

K. V. Terzaghi 在研究饱和土的固结、水与土壤的相互作用时，提出了有效应力理论。Robinson 等研究得出，在水压力作用下岩石的有效应力为

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \alpha p \delta_{ij} \quad (7)$$

式中： σ'_{ij} 为有效应力张量(MPa)； σ_{ij} 为总应力张量(MPa)； α 为等效孔隙压力系数，取决于岩石的孔隙和裂隙的发育程度， $0 \leq \alpha \leq 1$ ； p 为静水压力(MPa)； δ_{ij} 为 Kronecker 符号。

含水量对岩石变形破坏影响机制可有有效应力和莫尔-库仑理论说明^[3]，表征岩石破坏准则的莫尔-库仑公式为

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c \quad (8)$$

当岩体孔隙及裂隙上作用有水压力时，其有效正应力为 $\sigma' = \sigma - \alpha p$ ，则此时岩体强度公式表示为

$$\tau = (\sigma - \alpha p) \tan \varphi + c = \sigma \tan \varphi + (c - \alpha p \tan \varphi) \quad (9)$$

式(9)可写成

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c_w \quad (10)$$

式中： c_w 为浸水后岩石的黏聚力，且有

$$c_w = c - \alpha p \tan \varphi \quad (11)$$

同样可得由于水的影响岩石的抗压强度(R_w)为

$$R_w = R_c - \frac{2\alpha p \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (12)$$

式(12)即为水压力作用下的莫尔-库仑强度准则，可以看出，有水压力作用使得岩石黏聚力减少了 $\alpha p \tan \varphi$ ，抗压强度减小了 $\frac{2\alpha p \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$ 。

同样，水压力还会降低岩石的弹性模量，岩石的弹性模量与水压力有如下关系：

$$E = c - dp \tag{13}$$

式中: c, d 均为系数。

3 含水量对岩石冲击倾向性的影响

3.1 试验原理及方法

煤、岩的冲击倾向性是煤、岩的内在属性, 是发生冲击地压的内在因素。岩石单轴压缩条件下的变形破坏过程蕴涵着冲击倾向的丰富信息, 因此, 大多数基于煤岩特性的冲击倾向性指标都是建立在煤、岩单轴压缩条件下力学行为的基础上而提出的。为了研究岩石含水量对冲击倾向性的影响, 特别严格挑选了 4 块岩性和结构基本相同的极细 - 细粒砂岩试样, 最大限度地消除了岩性、结构特征对其宏观力学性质和冲击倾向性的影响作用。

(1) 弹性能指标

弹性能指标是一种以弹性能与永久变形耗散能的比值作为衡量煤岩体冲击倾向程度的指标^[7~9]。具体作法是, 先用常规抗压试验, 确定试件的平均单轴抗压强度。然后用试件以一定的速度加载到抗压强度的 70%~90%, 再以同样的速度卸载, 根据其加载 - 卸载曲线即可得到弹性能指标 W_{ET} , 表达式为

$$W_{ET} = \frac{E_E}{E_p} \tag{14}$$

式中: E_E 为积蓄的弹性能, 即卸载曲线下的面积; E_p 为耗散的永久变形能, 即加载和卸载曲线之间的面积。 W_{ET} 值越大, 裂纹稳定扩展过程中耗散的能量越小, 冲击倾向性就越强。

(2) 脆性指标修正值(BIM)

弹性能指标较好地反映了岩石在加载过程中的能量积蓄和耗散规律, 但是其不足之处在于测定弹性能指标之前无法准确确定其单轴抗压强度, 因此只是大概的达到其单轴抗压强度的 70%~90%。而且, 卸载的大小及弹性能指数都直接受荷载与峰值的相对大小影响^[14]。为了克服这一不足, M. Aubertin 等^[10]提出了脆性指标修正值(BIM)。具体做法是: 对岩样进行单轴压缩直至其破坏, 过峰值强度点以变形模量(50%峰值强度处的变形模量)为斜率所做斜线下的面积为 A_1 ; 加载曲线下的面积为 A_2 , 如图 3 所示, 则 BIM 的值表示为

$$BIM = \frac{A_2}{A_1} \geq 1.0 \tag{15}$$

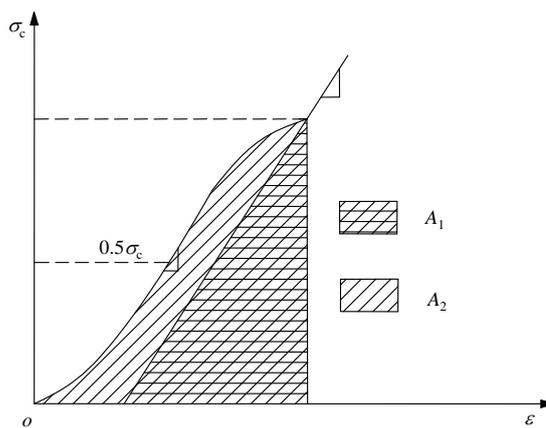


图 3 脆性指标修正值(BIM)计算示意图
Fig.3 Analytical plot of the index of BIM

BIM 的值越小, 冲击倾向性越高。M. Aubertin 等采用这一指标对岩石的冲击倾向性进行了分类(见表 4):

表 4 根据 BIM 值的大小对冲击倾向性划分方法^[10]
Table4 Evaluation of bursting potential based on the index of BIM^[10]

BIM	冲击倾向性
1.00~1.20	高
1.20~1.50	中
>1.50	低

3.2 含水量对岩石冲击倾向性的影响

随着含水量增加, 砂岩的弹性模量及峰值强度均急剧降低, 且峰值强度对应的应变值有随之增大的趋势(见图 4)。除含水量对岩石变形与强度影响外, 水对岩石的冲击倾向性的影响也较为显著, 图 5 为本次试验中的含极细 - 细粒岩屑长石砂岩的 BIM 和弹性变形指数与含水量的关系图。从图中数据点的分布规律可以看出, 随着含水量的增加, 岩石的 BIM 值逐渐增大, 岩石的弹性变形指数(峰前弹性变形量与峰前总变形量之比)逐渐减小, 其数据点的拟

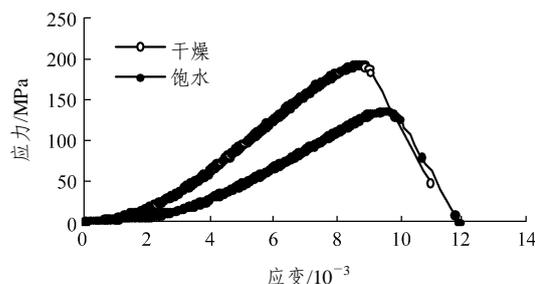


图 4 不同含水状态下砂岩全应力 - 应变曲线
Fig.4 Complete stress-strain curves of sandstone under different moistures contents

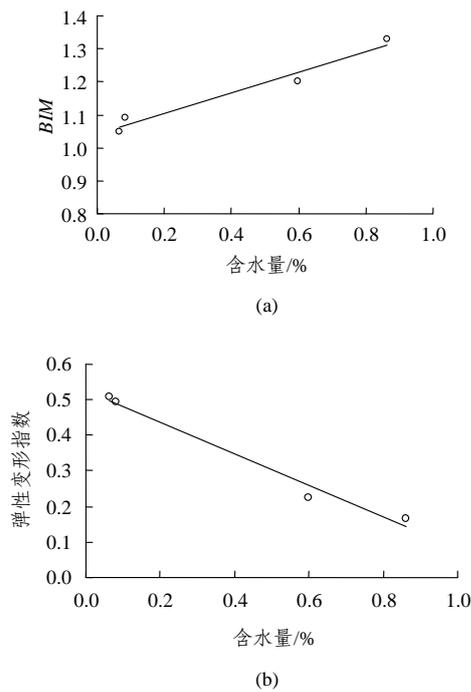


图5 极细-细粒砂岩的脆性指标修正值(BIM)和弹性变形指数与含水量的关系

Fig.5 Correlation between moisture content of very fine-fine sandstone and selected parameters including index of BIM and index of elastic deformation

合曲线呈线性关系。其中,岩石的 BIM 值与含水量的关系式为

$$\left. \begin{aligned} BIM &= 0.312 3w + 1.041 9 \\ R^2 &= 0.961 5 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

岩石的弹性变形指数与含水量的关系式为

$$\left. \begin{aligned} U &= -0.443w + 0.526 \\ R^2 &= 0.979 6 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

也就是说,随着含水量的增加,岩石在变形过程中,弹性变形相对减小,而塑性变形相对增加,即岩石的脆性逐渐减弱而塑性逐渐增强。岩石在受力过程中积蓄的弹性应变能逐渐减少,而在塑性变形中所消耗的永久变形能相对增加,即冲击倾向性逐渐减弱。从图5也可以看出,随着含水量的增加,岩石的冲击倾向性由高冲击倾向性(BIM = 1.05)变为中等冲击倾向性(BIM = 1.38)。这与煤矿中采用煤层注水法预防冲击地压的机制是一致的。

4 结 论

(1) 水对碎屑岩类的单轴抗压强度、弹性模量

和变形破坏形式都具有显著影响作用。不同岩性岩石由于成分和结构不同,吸水性不一样,表现为砂岩和石灰岩岩石强度和刚度大,岩石的吸水性相对较弱;而泥岩岩石的强度和刚度小,岩石的吸水性相对较强,岩石单轴抗压强度和弹性模量值随含水量的增加而降低。

(2) 不同岩性岩石单轴抗压强度和弹性模量值受含水量的影响程度不同,降低的速率受岩性控制,则不完全相同,主要取决于岩石成分、结构、岩石胶结状况、结晶程度和是否含有亲水性黏土矿物等因素。岩石单轴抗压强度和弹性模量值随含水量的增加而呈线性规律降低,降低的速率受岩性所控制。

(3) 在干燥或较少含水量情况下,应力—应变曲线在峰值强度后岩石表现为脆性和剪切破坏,具有明显的应变软化特性,且随着含水量的增加,峰值强度后岩石主要为塑性破坏,应变软化特性不明显。

(4) 随着含水量的增加,碎屑岩的 BIM 值逐渐增加,弹性变形指数逐渐减小。岩石在受力过程中储存的弹性应变能随含水量的增加而急剧减少,而消耗的塑性永久变形能相对增加,即岩石的冲击倾向性随含水量的增加而显著降低。

(5) 含水量对岩石的力学性质和冲击倾向性的影响十分明显,在地下工程岩体稳定性评价时,只有认真地考虑地下水因素,将使得复杂的地下工程设计与施工决策更趋于合理与可靠。

参考文献(References):

- [1] MENG Z P, ZHANG J C. Influence of sedimentary environments on mechanical properties of clastic rocks[J]. Environmental Geology, 2006, 51(1): 113 - 120.
- [2] MÜLLER L. 岩石力学[M]. 李世平译. 北京: 煤炭工业出版社, 1981.(MÜLLER L. Rock mechanics[M]. Translated by LI Shipping. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1981.(in Chinese))
- [3] 张金才, 张玉卓, 刘天泉. 岩体渗流与煤层底板突水[M]. 北京: 地质出版社, 1997.(ZHANG Jincai, ZHANG Yuzhuo, LIU Tianquan. Rock mass seepage and seepage and water projecting in coal bed[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997.(in Chinese))
- [4] 孟召平. 含煤岩系岩石力学性质控制因素探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 102 - 106.(MENG Zhaoping. Study on control factors of rock mechanics properties of coal-bearing formation[J].

- Chinese Journal of Rock Mechanics And Engineering, 2002, 21(1): 102 - 106.(in Chinese))
- [5] 王 军, 何 淼, 汪中卫. 膨胀砂岩的抗剪强度与含水量的关系[J]. 土木工程学报, 2006, 39(1): 98 - 102.(WANG Jun, HE Miao, WANG Zhongwei. Relationship between the shear strength and water content of swelling sandstones[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(1): 98 - 102.(in Chinese))
- [6] 刘 斌, 王宝善, 席道瑛, 等. 水饱和裂纹对地壳岩样中地震波速及各向异性的影响[J]. 地球物理学报, 1999, 42(5): 702 - 710. (LIU Bin, WANG Baoshan, XI Daoying, et al. The effects of water saturated cracks on seismic velocity and anisotropy in crustal rocks[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1999, 42(5): 702 - 710.(in Chinese))
- [7] WANG J A, PARK H D. Comprehensive prediction of rock burst based on analysis of strain energy in rocks[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2001, 16(1): 49 - 57.
- [8] KIDYBINSKI A. Bursting liability indices of coal[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1981, 18(6): 295 - 304.
- [9] NEYMAN B, SZECOWKA Z, ZUBEREK W. Effective methods for fighting rock burst in Polish collieries[C]// Proceedings of the 5th Int. Strata Control conf. [S. l.]: [s. n.], 1972: 1 - 9.
- [10] AUBERTIN M, GILL D E, SIMON R. On the use of the brittleness index modified(BIM) to estimate the post-peak behavior of rocks[C]// The First North American Rock Mech. Symposium. Rotterdam: A. A. Balkema, 1994: 945 - 952.
- [11] 唐礼忠, 王文星. 一种新的岩爆倾向性指标[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 874 - 878.(TANG Lizhong, WANG Wenxing. New rock burst proneness index[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(6): 874 - 878.(in Chinese))
- [12] MENG Z P, PAN J N. Correlation between petrographic characteristics and failure duration in clastic rocks[J]. Engineering Geology, 2007, 89: 258 - 265.
- [13] 周瑞光, 曲永新, 成彬芳, 等. 山东龙口北皂煤矿软岩力学特性试验研究[J]. 工程地质学报, 1996, 4(4): 55 - 60.(ZHOU Ruiguang, QU Yongxin, CHENG Binfang, et al. The mechanical properties of soft and weak rock in Longkou coal mine, Shandong[J]. Journal of Engineering Geology, 1996, 4(4): 55 - 60.(in Chinese))
- [14] HUECKEL T. Hysteresis evolution and failure in cyclic loading of dilatant rocks[C]// Constitutive Laws for Engineering Materials: Theory and Applications. [S. l.]: Elsevier Science Pub., 1987: 565 - 572.